doi:10.13866/j.azr.2019.04.14

土壤水分胁迫对紫花苜蓿光合特性及其生物量的影响①

刘　军[1]，齐广平[1]，康燕霞[1]，马彦麟[1]，栗　志[2]
（1. 甘肃农业大学水利水电工程学院，甘肃 兰州　730070；2. 甘肃杨柳青牧草饲料开发有限公司，甘肃 金昌　737200）

摘　要： 紫花苜蓿是我国重要的豆科牧草，具有较强的抗旱能力，而水分亏缺是影响其产量的主要逆境因子之一。通过大田试验对不同水分胁迫下紫花苜蓿的光合特性及产量进行研究，结果表明：① 土壤水分胁迫对紫花苜蓿光响应参数影响显著（$P<0.05$），随着水分胁迫的加剧，最大净光合速率、表观量子效率、光饱和点逐渐降低，暗呼吸速率、光补偿点逐渐升高，从而直接影响紫花苜蓿光合作用对弱光的吸收和转化效率。② 随着水分胁迫的加剧紫花苜蓿叶片的净光合速率（P_n）和蒸腾速率（T_r）呈显著的下降趋势，气孔导度（G_s）呈先下降后上升的趋势，表明轻度水分胁迫下气孔因素是 P_n 下降的主要因素，中度和重度水分胁迫下非气孔因素是 P_n 降低的主要因素。③ 当光合有效辐射（*PAR*）为 1 200 μmol · m^{-2} · s^{-1}时，轻度水分胁迫的水分利用效率（*WUE*）显著大于充分灌溉的 *WUE*（$P<0.05$），表明适度水分胁迫可提高紫花苜蓿叶片的水分利用效率。④ 轻度水分胁迫与充分灌溉干草产量之间无显著差异，表明轻度水分胁迫能达到高产节水的目的。

关键词： 紫花苜蓿；地下滴灌；水分利用效率；水分胁迫；光合作用；生物量；永昌；甘肃

水分不仅是影响植物生产的主要因子，也是制约我国农业和经济发展的重要因素[1]，尤其是在我国西北荒漠化灌区，由于降雨量少，蒸发量大，因此水分亏缺成了制约农业生产的主要问题[2]。水分亏缺不仅限制植物生长，而且影响其光合作用，进而影响植物产量的形成[3-4]，为获得高产，人们通常采用灌溉的方式为植物提供水分。水分胁迫的加剧不仅会损伤植物的光合器官，而且会抑制植物的光合反应[5]。因此，研究水分胁迫下植物对水分的需求及光响应机制，可为干旱区农业高产稳产中合理灌溉提供科学依据。

紫花苜蓿是世界上种植最广泛的多年生豆科牧草，由于其产量高且营养丰富而被誉为“牧草之王”，在国内被广泛种植[6-8]。作为一种重要的牧草，随着人们生活水平的提高，畜牧业的迅速发展，对其产量的需求量越来越大[9]。虽然紫花苜蓿抗旱性和适应性强[10]，但需水量也大，严重的水分亏缺会影响其生长和产量[11]。光合作用在植物生长发育和产量的形成过程中发挥着十分重要的作用，绿色植物 95% 以上的干物质是通过光合作用产生的[12]。而水分是影响光合进程的主要因素[13]，水分胁迫会导致光合器官受伤，从而抑制植物的光合作用[14]。研究表明：在水分胁迫下，玉米叶片正常的光合作用有所改变，光合速率日变化的峰值提前，光合特性下降[15]；同样在水分胁迫下，糜子叶片的净光合速率降低、气孔导度和胞间 CO_2 浓度下降，从而导致糜子生物量和产量的降低[16]。紫花苜蓿对水分亏缺十分的敏感，在甘肃河西走廊荒漠绿洲区靠天然降水无法保证紫花苜蓿的正常生长。目前，对于紫花苜蓿的研究是不同品种紫花苜蓿在水分胁迫下的光合生理参数，从而得出其抗旱性强弱[17-21]，而对西北地区在水分胁迫下紫花苜蓿的光合生理变化的研究较少。

本次试验通过研究滴灌模式下紫花苜蓿在西北灌区不同水分胁迫下的光合生理变化，以揭示水分胁迫与光合生理之间的关系，从而得出正常光合生理下的水分需求，为永昌灌区高效节水提供依据。

① **收稿日期：** 2018-12-29；　**修订日期：** 2019-03-06
基金项目： 国家重点研发计划“水资源高效利用专项”（2016YFC0400306）；农业行业专项（201403048）
作者简介： 刘军（1990-），男，硕士研究生，主要从事旱区水资源的高效利用研究. E-mail：278576382@qq.com
通讯作者： 齐广平. E-mail：qigp@gsau.edu.cn

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2017年8月在甘肃省金昌市永昌县水源镇杨柳青牧草饲料开发有限公司进行(102°30′E,38°12′N,海拔1 487 m)。试验区属于温带大陆性气候,年平均降雨量235 mm,年平均气温7.7℃,全年无霜期150 d,年平均日照2 884.2 h,日照率65%。年蒸发量2 000.6 mm。

1.2 试验材料

甘农3号紫花苜蓿,由甘肃杨柳青牧草饲料开发有限公司提供;滴灌材料由新疆中油节水科技公司提供的内镶式贴片滴灌带,管径16 mm,壁厚0.4 mm,滴头流量3.0 L·h^{-1},滴头间距30 cm。

1.3 试验设计

试验采用大田随机区组设计。在第2茬进行全生育期水分调控,土壤的田间最大持水量为25.2%。试验分4个水分处理:CK为充分灌溉(土壤水分为田间持水量的75%~85%);LK为轻度水分胁迫(土壤水分为田间持水量的65%~75%);MK为中度水分胁迫(土壤水分为田间持水量的55%~65%);SK为重度水分胁迫(土壤水分为田间持水量的45%~55%);其中CK为对照处理,每个处理3次重复,共12个小区,每小区面积为50 m^2(5 m×10 m)。当各小区0.6 m以上土层的土壤体积含水量占田间持水量达到所在处理的设计水分下限时开始灌水(表1)

选择晴朗无风的天气在9:00—17:00于初花期对紫花苜蓿进行光合指标测定。采用美国生产的Li-6400XT便携式光合仪,随机选取生长良好、高度相同且光照相似的相同叶位处(即从顶部向下第4个完全展开叶的中间小叶)的叶片。利用光源控制光合有效辐射(PAR,μmol·m^{-2}·s^{-1})强度,在14个PAR(设定0、20、50、80、100、150、200、400、600、800、1 000、1 200、1 500、2 000 μmol·m^{-2}·s^{-1})下测定指标包括叶片净光合速率(P_n,μmol·m^{-2}·s^{-1})、气孔导度(G_s,mmol·m^{-2}·s^{-1})、胞间CO_2浓度(C_i,μmol·mol^{-1})和蒸腾速率(T_r,mmol·m^{-2}·s^{-1})。

表1 地下滴灌条件下紫花苜蓿调亏灌溉试验灌水下限

Tab.1 Lower irrigation limit of each RDI treatment under SDI /%

处理	分枝前期 06-28—07-03	分枝期 07-04—07-25	现蕾期 07-26—08-15
CK	75	75	75
LK	65	65	65
MK	55	55	55
SK	45	45	45

注:CK表示充分灌溉,LK表示轻度水分胁迫,MK表示中度水分胁迫,SK表示重度水分胁迫;灌水下限为土壤体积含水量占田间持水量的百分比。下同。

叶片水分利用效率(WUE,μmol·$mmol^{-1}$)和气孔限制值(L_s)的计算公式如下:

$$WUE = P_n/T_r \quad (1)$$

$$L_s = 1 - C_i/C_a \quad (2)$$

式中:C_a为空气CO_2浓度(μmol·mol^{-1})。

绘制光合作用的光响应曲线(P_n-PAR曲线),求得光饱和点(LSP,μmol·m^{-2}·s^{-1});并对P_n-PAR曲线的初始部分($PAR<400$ μmol·m^{-2}·s^{-1})进行线性回归,求得光补偿点(LCP,μmol·m^{-2}·s^{-1})、表观量子效率(AQY,μmol·μmol^{-1})和暗呼吸速率(R_d,μmol·m^{-2}·s^{-1})。

1.4 数据处理与分析方法

采用Microsoft Excel 2007及SPSS 19.0进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 水分胁迫对紫花苜蓿光响应特征参数的影响

随着土壤水分胁迫的加剧,紫花苜蓿的最大净光合速率($P_{n\text{-}max}$)、表观量子效率(AQY)、光饱和点(LSP)均呈下降趋势;而暗呼吸速率(R_d)、光补偿点(LCP)均呈上升趋势(表2)。

$P_{n\text{-}max}$在各处理间差异显著($P<0.05$),与CK相比,LK、MK和SK处理的$P_{n\text{-}max}$分别降低了12.7%、36.4%和73.6%。AQY除了LK与MK之间的差异不显著外,其他处理之间均达到显著水平($P<0.05$),与CK相比,LK、MK和SK处理下AQY分别降低了17.1%、22.0%和63.4%。LSP在CK与LK处理间差异不显著,但MK和SK差异显著,从1 200 mol·m^{-2}·s^{-1}下降到了1 000、800 mol·m^{-2}·s^{-1}。R_d在CK与LK、MK、SK处理之间差异不显著,其他处理之间都达到显著水平($P<0.05$)。LCP除了LK与MK之间的差异不显著外,其他处理之间都达到显著水平($P<0.05$),与CK相比,LK、MK和SK处理下LCP分别增加了9.3%、13%

表 2　水分胁迫下紫花苜蓿的光合作用—光响应特征参数(±标准差)

Tab. 2　Characteristic parameters of photosynthesis-photoresponse of *Medicago sativa* under water stress

处理	最大净光合速率(P_{n-max}) /($mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	表观量子效率(*AQY*) /($\mu mol \cdot \mu mol^{-1}$)	暗呼吸速率(R_d) /($mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	光补偿点(*LCP*) /($mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	光饱和点(*LSP*) /($mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)
CK	23.32 ±0.402a	0.04 ±0.001a	−2.20 ±0.171b	54.70 ±2.646c	1 200a
LK	20.36 ±0.086b	0.03 ±0.002b	−2.01 ±0.371b	59.98 ±8.145b	1 200a
MK	14.84 ±0.091c	0.03 ±0.001b	−1.50 ±0.710a	61.57 ±0.577b	1 000b
SK	6.15 ±0.291d	0.02 ±0.001c	−1.22 ±0.074a	81.43 ±1.528a	800c

注:同列不同小写字母表示不同处理间在 $P<0.05$ 水平上差异显著。

和 50% (表 2)。

2.2　光合作用各项指标的变化

2.2.1　水分胁迫对紫花苜蓿叶片净光合速率的影响　紫花苜蓿光合速率的光响应过程在土壤 LK、MK、SK 处理下,与 CK 处理保持一致,当光合有效辐射强度(*PAR*) <200 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$时,$P_n$ 呈直线上升趋势;当 *PAR* 为 200 ~800 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$时,$P_n$ 随着 *PAR* 增长速度变慢但明显升高;当 *PAR* >800 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$时,$P_n$ 的升高幅度明显减小;当达到光饱和点时,随着 *PAR* 的增强 P_n 呈逐渐降低趋势。随着水分胁迫的加剧,紫花苜蓿的 P_n 呈降低趋势,在 *PAR* =1 200 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$时,LK、MK 和 SK 处理下紫花苜蓿的 P_n 分别为 20.36、14.64 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$和 6.05 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,比 CK(23.28 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)处理分别降低12.5% 、37.1% 和 74.0% (图 1a)。

2.2.2　水分胁迫对紫花苜蓿叶片气孔导度的影响

正常供水条件下,紫花苜蓿的气孔导度(G_s)随光照有效辐射的增加呈逐渐上升的趋势。当光照强度小于光补偿点时,上升幅度较小;而当光照强度大于光补偿点时,上升幅度比较大。但在不同水分处理下 G_s 差异显著,当 *PAR* =1 200 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$时,LK、MK 和 SK 处理下紫花苜蓿的 G_s 分别为 0.37、0.21 $mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$和 0.13 $mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,比 CK(0.48 $mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)处理分别降低了 23.8% 、56.8% 和 73.5% (图 1b)。

2.2.3　水分胁迫对紫花苜蓿叶片胞间 CO_2 浓度的影响　充分灌溉情况下,当光照强度小于光补偿点时,胞间 CO_2 浓度(C_i)随着光照强度的增加而迅速变小;当光照强度大于光饱和点时,C_i 曲线随着光照强度的增加而逐渐变的平缓并出现上升趋势。随着水分胁迫的加剧,在 *PAR* =1 200 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$左右时,LK 处理下的 C_i 值略低于 CK,但无显著差异,MK、SK 处理下的 C_i 值高于 CK,差异显著(图 1c)。

2.2.4　水分胁迫对紫花苜蓿叶片蒸腾速率的影响

正常供水条件下,紫花苜蓿蒸腾速率(T_r)在 *PAR* =1 200 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$时的值为 8.89 $mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,随着水分胁迫的加剧,$T_r$ 也大幅度的下降,与 CK 相比,LK、MK 和 SK 处理下紫花苜蓿的 T_r 分别降低了 17.9% 、28.3% 和 41.7% (图 1d)。

2.2.5　水分胁迫对紫花苜蓿叶片水分利用效率的影响　在 LK、MK 和 SK 处理下,紫花苜蓿叶片水分利用效率(*WUE*)的光响应过程基本与 CK 处理相同,表现为随着 *PAR* 的增强由强到弱,均由较快增加转变为缓慢增加的过程(图 1)。当 *PAR* =1 200 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$时,CK 与 LK 处理无显著差异,与 MK、SK 处理差异显著;当 *PAR* >1 200 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$时,紫花苜蓿的 *WUE* 呈现出缓慢下降的趋势,各处理间均差异显著;当 *PAR* =1 500 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$左右时,在 LK 处理下的 *WUE* 大于正常供水下的 *WUE*,其次是 MK 处理,最后是 SK 处理(图 1e)。

2.2.6　水分胁迫对紫花苜蓿叶片气孔限制值的影响　充分灌溉条件下,紫花苜蓿的气孔限制值(L_s)在 *PAR* =1 200 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$时的值为 0.48,随着水分胁迫的加剧,LK 处理下的 L_s 有较小幅度的上升,与 CK 相比上升了 6.3% ,MK、SK 处理下的 L_s 降低,与 CK 相比降低了 16.7% 和 29.2% (图 1f)。

2.3　紫花苜蓿光合生理参数的相关性分析

紫花苜蓿叶片 WUE 与 P_n、G_s、T_r、L_s 呈极显著正相关,与 C_i 呈极显著负相关;P_n 与 G_s、T_r、L_s 呈极显著正相关,与 C_i 呈极显著负相关;L_s 与 C_i 呈极显著负相关,与其余各指标均呈极显著正相关(表 3)。

2.4　水分胁迫对紫花苜蓿地上生物量的影响

图 2 反映了紫花苜蓿的干草产量随着生育期出现明显的增加,在分支前期到分枝期、现蕾期到初花期增加较为明显,说明在这段时期内紫花苜蓿对水

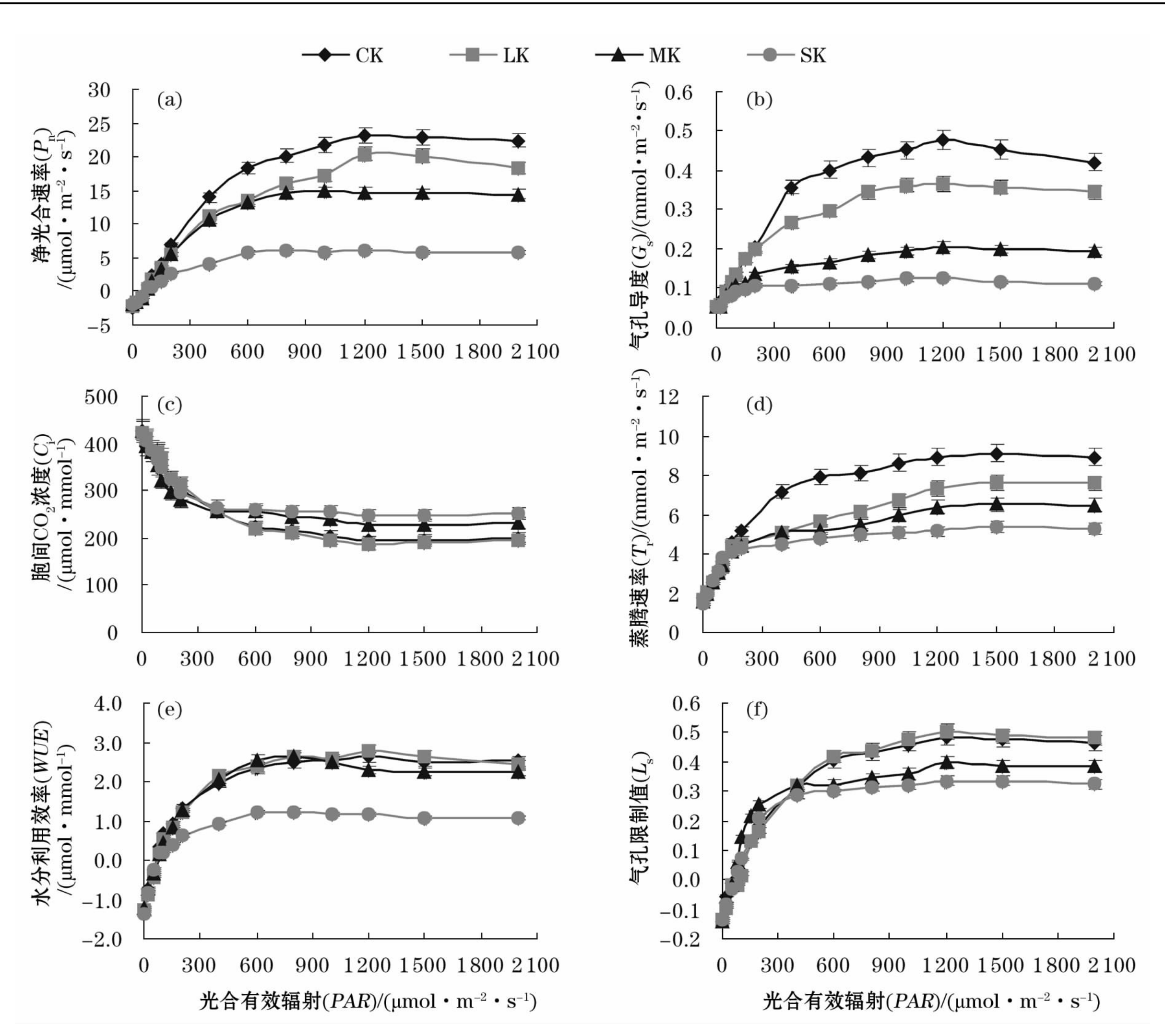


图 1 水分胁迫下紫花苜蓿光合生理参数对不同光合有效辐射(*PAR*)的响应

Fig. 1 Responses of photosynthetic physiological parameters of *Medicago sativa* to the photosynthetically active radiation (*PAR*) under water stress

表 3 紫花苜蓿光合生理参数的相关性分析

Tab. 3 Correlation analysis of photosynthetic physiological parameters of *Medicago sativa*

	水分利用效率(*WUE*)/(μmol·mmol^{-1})	净光合速率(P_n)/(μmol·m^{-2}·s^{-1})	气孔导度(G_s)/(mmol·m^{-2}·s^{-1})	胞间 CO_2 浓度(C_i)/(μmol·mol^{-1})	蒸腾速率(T_r)/(mmol·m^{-2}·s^{-1})	气孔限制值(L_s)
WUE	1					
P_n	0.917**	1				
G_s	0.753**	0.951**	1			
C_i	-0.816**	-0.922**	-0.924**	1		
T_r	0.739**	0.946**	0.993**	-0.879**	1	
L_s	0.815**	0.992**	0.925**	-1.000**	0.880**	1

注:** 表示在 0.01 水平上差异显著($P<0.01$)。

分的需求更为敏感。由图 2 可知,对于不同水分胁迫对紫花苜蓿干草产量的影响,在 LK 处理下紫花苜蓿的干草产量与 CK 基本相同,而 MK 和 SK 明显降低。通过分析表明 LK 与 CK 差异不显著,MK、SK 与 CK 差异显著(表 4)。

紫花苜蓿的株高和茎粗随着水分胁迫的加剧而呈现减小趋势。通过分析表明 LK 处理的株高和茎粗与 CK 差异不显著,MK 和 SK 处理下的株高及茎粗与 CK 差异显著,而 MK 与 SK 处理下的株高差异显著,茎粗差异不显著(表 4)。

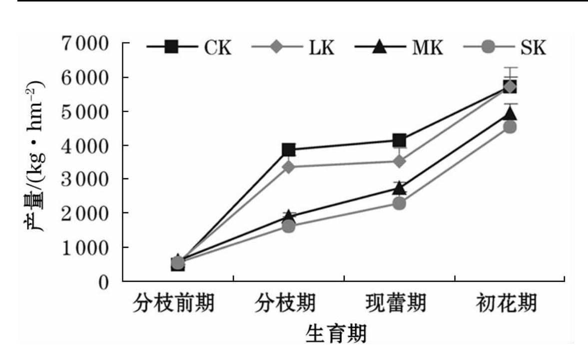


图 2　水分胁迫对紫花苜蓿产量的影响

Fig. 2　Effect of water stress on the yield of *Medicago sativa*

表 4　紫花苜蓿生长指标的相关性分析

Tab. 4　Correlation analysis of growth indicators of *Medicago sativa*

处理	株高 /mm	茎粗 /mm	鲜草产量 /(kg·hm^{-2})	干草产量 /(kg·hm^{-2})
CK	100±5a	3.57±0.31a	24 586±330a	5 717±254a
LK	97±5a	3.51±0.34a	24 449±291a	5 684±220a
MK	86±4b	3.33±0.31b	21 234±269b	4 940±175b
SK	76±4c	3.28±0.38b	19 453±221c	4 519±181c

注:不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著。

3　讨论

光响应曲线不仅可以反映植物光合速率随光照强度增减的变化规律,并且可以了解植物光合能力及不同环境对其影响程度[22]。本试验对紫花苜蓿的光响应曲线拟合表明,在同一 *PAR* 下,随着水分胁迫的加剧,P_n 降幅增大,表明水分胁迫加重了紫花苜蓿光抑制强度、降低了植物 Rusbico 活性及电子传递速率[23]。随着水分胁迫的加剧,紫花苜蓿的 $P_{n\text{-}max}$、*AQY*、*LSP* 均呈现下降趋势,而 R_d、*LCP* 呈升高趋势,表明在水分胁迫下紫花苜蓿叶片对弱光和强光的利用率均降低[24],这与倪霞等[25]在毛竹上的研究结果一致。

在植物生长过程中,土壤水分对植物光合作用的影响最为突出[26]。通常在水分胁迫条件下,可通过气孔因素影响光合作用,也可以通过非气孔因素影响光合作用[27]。Parquhar 等[28]认为,当 P_n、G_s 和 C_i 同时降低时,表明光合速率降低的主要原因是气孔因素,否则 P_n 的下降要归因于叶肉细胞光合能力的降低,即非气孔因素限制所致。本研究发现,在 CK 和 LK 处理下紫花苜蓿 P_n 下降的同时,C_i 降低,L_s 升高,表明 LK 处理下气孔因素是紫花苜蓿光合作用降低的主要因素;在 MK 和 SK 处理下,随着紫花苜蓿 P_n 的降低,L_s 下降,C_i 却呈上升趋势,表明 P_n 的下降由气孔因素转变为非气孔因素,这一结论与韩清芳、韩瑞红、李志军等[17,29-30]对紫花苜蓿的研究相似。

水分利用效率(*WUE*)用 P_n 与 T_r 的比值来反应,是衡量碳固定和水分消耗的指标[31]。其中有多个研究表明,适当水分胁迫可以提高紫花苜蓿的 *WUE*[21,32]。本研究发现在光合有效辐射(*PAR*)在 800 μmol·m^{-2}·s^{-1}左右时,LK 处理的 *WUE* 稍大于 CK,而当 *PAR*=1 200 μmol·m^{-2}·s^{-1}时,LK 处理的 *WUE* 明显大于 CK,表明在 LK 处理下,紫花苜蓿的 *WUE* 有一定程度的提高[33-34]。

土壤中水分的分布影响着紫花苜蓿的根系生长,决定着紫花苜蓿对养分的吸收能力,引起植株中养分的变化,进而影响紫花苜蓿的产量[35]。本研究表明,紫花苜蓿的地上生物量随着水分胁迫的加剧而呈现降低趋势,但在 LK 处理下更有利于紫花苜蓿光合作用和干物质的积累,不会引起干草产量的降低,这一结论与郭松年、陈林等对紫花苜蓿的研究结果相一致[36-37]。

4　结论

土壤水分胁迫显著影响紫花苜蓿叶片的光响应参数,随着水分胁迫的加剧,紫花苜蓿叶片的最大净光合速率、表观量子效率、光饱和点呈逐渐降低趋势,暗呼吸速率、光补偿点呈逐渐升高趋势,紫花苜蓿叶片的净光合速率和蒸腾速率呈下降趋势,气孔导度呈先下降后上升趋势,表明轻度水分胁迫下气孔因素是光合速率下降的主要因素,中度和重度水分胁迫下非气孔因素是光合速率降低的主要因素。轻度水分胁迫与充分灌溉的干草产量之间无显著差异,表明轻度水分胁迫能达到高产节水的目的。

参考文献(References):

〔1〕　李跃,万里强,李向林,等.水分胁迫对不同紫花苜蓿品种幼苗生长特性和根系 ABA 含量的影响〔J〕.中国农业大学学报,2017,22(10):75-83.〔Li Yue,Wan Liqiang,Li Xianglin,et al. Effects of water stress on the growth characteristics and root ABA content of alfalfa〔J〕. Journal of China Agricultural University,2017,22(10):75-83.〕

〔2〕　李国龙,孙亚卿,张少英.水分胁迫对甜菜幼苗光合作用的影响〔J〕.内蒙古农业大学学报(自然科学版),2012,33(1):

68 - 72.〔Li Guolong,Sun Yaqing,Zhang Shaoying. Effects of water stress on photosynthesis of sugar seedling〔J〕. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition),2012,33(1):68 - 72.〕

〔3〕 李立辉,王岩,胡海燕,等. 初花期干旱对不同抗旱性紫花苜蓿光合特征及荧光参数的影响〔J〕. 华北农学报,2015,30(4):126 - 131.〔Li Lihui,Wang Yan,Hu Haiyan,et al. Responses of photosynthetic charaters and fluorescence parameters of alfalfa with different drought tolerances to drought〔J〕. Acta Agriculturae Boreali-Sinica,2015,30(4):126 - 131.〕

〔4〕 Li S H,Xu X,He J. Study on photosynthetic physiology characteristic of *Cynanchum komarovii* underwater stress〔J〕. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2004,24(1):100 - 104.

〔5〕 范苏鲁,苑兆和,冯立娟,等. 水分胁迫对大丽花光合作用、蒸腾和气孔导度的影响〔J〕. 中国农学通报,2011,27(8):119 - 122.〔Fan Sulu,Yuan Zhaohe,Feng Lijuan,et al. Effects of water stress on photosynthesis,transpiration and stomatal conductance in dahlia leaves〔J〕. Chinese Agricultural Science Bulletin,2011,27(8):119 - 122.〕

〔6〕 田德龙,李熙婷,郭克贞,等. 河套灌区地下滴灌对紫花苜蓿生长特性的影响〔J〕. 节水灌溉,2015(5):16 - 19.〔Tian Delong,Li Xiting,Guo Kezhen,et al. The influence of subsurface drip irrigation to alfalfa growth characteristics in Hetao irrigation area〔J〕. Water Saving Irrigation,2015(5):16 - 19.〕

〔7〕 郭彦芬,霍轶珍,王文达. 紫花苜蓿耗水规律及灌溉制度优化研究〔J〕. 节水灌溉,2017(3):8 - 10,13.〔Guo Yanfen,Huo Yizhen,Wang Wenda. A study on water consumption law and irrigation regime for alfalfa〔J〕. Water Saving Irrigation,2017(3):8 - 10,13.〕

〔8〕 刘文兰,师尚礼,田福平. 种植密度对紫花苜蓿生物量与不同叶位光合特性的影响〔J〕. 草原与草坪,2017,37(4):14 - 19,25.〔Liu Wenlan,Shi Shangli,Tian Fuping. Effects of planting density on biomass and photosynthetic characteristics of alfalfa leaves at different position〔J〕. Grassland and Turf,2017,37(4):14 - 19,25.〕

〔9〕 陈托兄,郝文军,陈小兵,等. 10 个紫花苜蓿品种光合特性的比较〔J〕. 中国草地学报,2009,31(2):41 - 45.〔Chen Tuoxiong,Hao Wenjun,Chen Xiaobing,et al. Comparison of photosynthetic characteristics of 10 alfalfa cultivars〔J〕. Chinese Journal of Grassland,2009,31(2):41 - 45.〕

〔10〕 王冲,王飞,薛韬,等. 不同滴灌管埋深对紫花苜蓿水分利用效率和草地覆盖率的影响〔J〕. 节水灌溉,2018(1):42 - 44.〔Wang Chong,Wang Fei,Xue Tao,et al. A study on water use efficiency and grassland coverage of alfalfa under different drip pipes buried depth〔J〕. Water Saving Irrigation,2018(1):42 - 44.〕

〔11〕 闫曼曼,郑剑超,张巨松,等. 调亏灌溉对海岛棉光合物质生产与分配的影响〔J〕. 干旱区研究,2016,33(6):1 351 - 1 357.〔Yan Manman,Zheng Jianchao,Zhang Jusong,et al. Effects of regulated deficit irrigation on production and distribution of photosynthetic matter in *Possypium barbadense* L.〔J〕. Arid Zone Research,2016,33(6):1 351 - 1 357.〕

〔12〕 闫艳红,杨文钰,张新全,等. 施氮量对套作大豆花后光合特性、干物质积累及产量的影响〔J〕. 草业学报,2011,20(3):233 - 238.〔Yan Yanhong,Yang Wenyu,Zhang Xinquan,et al. Effects of different nitrogen levels on photosynthetic characteristics,dry matter accumulation and yield of relay strip intercropping *Gglycine max* after blooming〔J〕. Acta Prataculture Sinica,2011,20(3):233 - 238.〕

〔13〕 杨司睿,范井伟,孙永强,等. 罗布泊腹地人工植被梭梭的光学特性及其对干旱胁迫的响应〔J〕. 干旱区研究,2018,35(2):379 - 386.〔Yang Sirui,Fan Jingwei,Sun Yongqiang,et al. Photosynthetic characteristics and response of *Haloxylon ammodendron* to drought stress in hinterland of the Lop Nur〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(2):379 - 386.〕

〔14〕 郑睿,康绍忠,胡笑涛,等. 水氮处理对荒漠绿洲区酿酒葡萄光合特性与产量的影响〔J〕. 农业工程学报,2013,29(4):133 - 141.〔Zheng Rui,Kang Shaozhong,Hu Xiaotao,et al. Effects of water and nitrogen conditions on the diurnal variation of photosynthesis characteristics and yield of grapevine in arid oasis region〔J〕. Transations of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2013,29(4):133 - 141.〕

〔15〕 于文颖,纪瑞鹏,冯锐,等. 不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应〔J〕. 生态学报,2015,35(9):2 902 - 2 909.〔Yu Wenying,Ji Ruipeng,Feng Rui,et al. Responses of water stress on photosynthetic characteristics and water use efficiency of maize leaves in different growth stages〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2015,35(9):2 902 - 2 909.〕

〔16〕 冯晓敏,张永清. 水分胁迫对糜子植株苗期生长和光合特性的影响〔J〕. 作物学报,2012,38(8):1 513 - 1 521.〔Feng Xiaomin,Zhang Yongqing. Effects of water stress on seedling growth and photosynthetic characteristics in broomcorn millet〔J〕. Acta Agronomica Sinica,2012,38(8):1 513 - 1 521.〕

〔17〕 韩瑞宏,卢欣石,高桂娟,等. 紫花苜蓿(*Medicago sativa*)对干旱胁迫的光合生理响应〔J〕. 生态学报,2007(12):5 229 - 5 237.〔Han Ruihong,Lu Xinshi,Gao Guijuan,et al. Photosynthetic physiological response of alfalfa (*Medicago sativa*) to drought stress〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2007(12):5 229 - 5 237.〕

〔18〕 张前兵,李艳霞,于磊,等. 5 个苜蓿品种群体光合生产特征比较〔J〕. 西北农业学报,2017,26(6):873 - 881.〔Zhang Qianbing,Li Yanxia,Yu Lei,et al. Canopy apparent photosynthetic characteristics of five alfalfa varieties〔J〕. Acta Agricultural Boreali-Occidentalis Sinica,2017,26(6):873 - 881.〕

〔19〕 温方. 紫花苜蓿不同品种生产性能及其光合特性研究〔D〕. 北京:中国农业科学院,2007.〔Wen Fang. Study on Productivity and Photosynthetic Characteristics of Different Alfalfa Varieties〔D〕. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences,2007.〕

〔20〕 李艳芳. 12 个国外引进苜蓿品种光合蒸腾特性的研究〔D〕. 杨凌:西北农林科技大学,2011.〔Li Yanfang. Study on Photosynthetic and Transpiration Characteristics of 12 Introduced Alfalfa Varieties〔D〕. Yangling:Northwest A&F University,2011.〕

〔21〕刘国利,何树斌,杨惠敏. 紫花苜蓿水分利用效率对水分胁迫的响应及其机理〔J〕. 草业学报,2009,18(3):207－213.〔Liu Guoli,He Shubin,Yang Huimin. The response and mechanism of water use efficiency to different water stress of three alfalfa varieties〔J〕. Acta Prataccultura Sinica,2009,18(3):207－213.〕

〔22〕叶子飘,于强. 光合作用光响应模型的比较〔J〕. 植物生态学报,2008,32(6):1 356－1 361.〔Ye Zipiao,Yu Qiang. Comparison of new and several classical models of photo-synthesis in response to irradiance〔J〕. Chinese Journal of plant Ecology,2008,32(6):1 356－1 361.〕

〔23〕陆燕元,马焕成,李昊民,等. 土壤干旱对转基因甘薯光合曲线的响应〔J〕. 生态学报,2015,35(7):2 155－2 160.〔Lu Yanyuan,Ma Huancheng,Li Haomin,et al. Light response characteristics of phpotosynthetic of transgenic sweet potato under drought stress〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2015,35(7):2 155－2 160.〕

〔24〕Xia J B,Zhang S Y,Zhang G C,et al. Critical response of photosynthetic efficiency in *Campsis radicans* (L.) seem to soil water and light intensities〔J〕. African journal of Biotechnology,2011,10(77):17 748－17 754.〕

〔25〕倪霞,曹永慧,周本智,等. 干旱处理对毛竹光响应的影响:基于4种模型比较分析〔J〕. 林业科学研究,2017,30(3):465－471.〔Ni Xia,Cao Yonghui,Zhou Benzhi,et al. Light response of *Phyllostachys edulis* under drought stress:Based on 4 models〔J〕. Forestry Research,2017,30(3):465－471.〕

〔26〕牟兰,何承刚,姜华,等. 干热胁迫对紫花苜蓿光合特性的影响〔J〕. 草地学报,2014,22(3):550－555.〔Mou Lan,He Chenggang,Jiang Hua,et al. Effect of drought and heatstress on photosynthetic characteristics of alfalfa〔J〕. Acta Agrestia Sinica,2014,22(3):550－555.〕

〔27〕高冠龙,冯起,张小由,等. 植物叶片光合作用的气孔与非气孔限制研究综述〔J〕. 干旱区研究,2018,35(4):929－937.〔Gao Guanlong,Feng Qi,Zhang Xiaoyou,et al. An overview of stomatal and non-stomatal limitations to photosynthesis of plants〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(4):929－937.〕

〔28〕Farquhar G D,Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis〔J〕. Annual Review of Plant Physiology,1982,33(1):317－345.

〔29〕韩清芳,贾志宽,王俊鹏,等. 黄土高原地区紫花苜蓿不同叶位光合日变化特征研究〔J〕. 草地学报,2009,17(5):558－563.〔Han Qingfang,Jia Zhikuan,Wang Junpeng,et al. Study on diurnal photosynthesis characteristics in alfalfa leaf layers in Loess Plateau〔J〕. Acta Academia Sinica,2009,17(5):558－563.〕

〔30〕李志军,罗青红,伍维模,等. 干旱胁迫对胡杨和灰叶胡杨光合作用及叶绿素荧光特性的影响〔J〕. 干旱区研究,2009,26(1):45－52.〔Li Zhijun,Luo Qinghong,Wu Weimo,et al. The effects of drought stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of *Populus euphratica* and *P. euphratica*〔J〕. Arid Zone Research,2009,26(1):45－52.〕

〔31〕Lakso A N. Seasonal changes in stomatal responses to leaf water potential in apple〔J〕. Journal American Society for Horticultural Science,1979,104(1):58－60.

〔32〕Yang H M,Zhang X Y,Wang G X. Relationship between stomatal character,photosynthetic character and seed chemical composition in grass pea at different water availabilities〔J〕. Journal of Agricultural Science,2004,142:675－681.

〔33〕韩希英,宋凤斌,王波,等. 土壤水分胁迫对玉米光合特性的影响〔J〕. 华北农学报,2006,21(5):28－32.〔Han Xiying,Song Fengbin,Wang Bo,et al. Effects of soil water stress on photosynthetic characteristics of maize〔J〕. Acta Agriculturae Boreali-Sinica,2006,21(5):28－32.〕

〔34〕杨涛,梁宗锁,薛吉全. 土壤干旱不同玉米品种水分利用效率差异的生理学原因〔J〕. 干旱地区农业研究,2002,20(2):68－71.〔Yang Tao,Liang Zongsuo,Xue Jiquan. Physiological mechanism of diversity of water use efficiency of maize varieties in soil drought〔J〕. Agricultural Research in the Arid Areas,2002,20(2):68－71.〕

〔35〕曹雪松,李和平,郑和祥,等. 地埋滴灌对紫花苜蓿耗水、产量及水分生产率的影响〔J〕. 干旱地区农业研究,2017,35(5):256－262.〔Cao Xuesong,Li Heping,Zheng Hexiang,et al. Effects of subsurface drip irrigation on water consumption,yield and water productivity of alfalfa〔J〕. Agricultural Research in the Arid Areas,2017,35(5):256－262.〕

〔36〕郭松年,丁林,王福霞. 作物调亏灌溉理论与技术研究进展及发展趋势〔J〕. 中国农村水利水电,2009(8):12－16.〔Guo Songnian,Ding Lin,Wang Fuxia. Theoretical and technology research advancement and development trend prospect of regulated deficit irrigation on crops〔J〕. China Rural Water and Hydropower,2009(8):12－16.〕

〔37〕陈林,王磊,宋乃平,等. 灌溉量和灌溉次数对紫花苜蓿耗水特性和生物量的影响〔J〕. 水土保持学报,2009,23(4):91－95.〔Chen Lin,Wang Lei,Song Naiping,et al. Effects of irrigation amount and times on water consumption characteristics and biomass of alfalfa〔J〕. Journal of Soil and Water Conservation,2009,23(4):91－95.〕

Effects of Soil Water Stress on Photosynthetic Characteristics and Biomass of *Medicago sativa*

LIU Jun[1], QI Guang-ping[1], KANG Yan-xia[1], MA Yan-lin[1], LI Zhi[2]
(1. *College of Water Resources and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou* 730070, *Gansu, China*;
2. *Gansu Yangliuqing Forage Feed Development Co., Ltd.*, *Jinchang* 737200, *Gansu, China*)

Abstract: *Medicago sativa* is an important legume forage in China, and it is strong in drought resistance. However, water deficit is still the main stress factor affecting its yield. The photosynthetic characteristics and yield of *M. sativa* under different water stress conditions were studied by carrying out the field experiments. The results showed that: ① Soil water stress affected significantly the photoresponse parameters of *M. sativa* ($P<0.05$). With the increase of soil water stress, the maximum net photosynthetic rate, apparent quantum yield and light saturation point were decreased gradually, but the dark respiration rate and light compensation point were gradually increased, thus the dyssophotic absorption and conversion efficiency of *M. sativa* in its photosynthesis were directly affected. ② With the increase of soil water stress, the net photosynthetic rate (P_n) and transpiration rate (T_r) of *M. sativa* leaves were reduced significantly, but the stomatal conductance (G_s) was decreased at first and then increased, which revealed that the stomatal factors under slight water stress were the main factors resulting in the P_n reduction, and the non-stomatal factors under moderate and severe water stress were the main factors resulting in the P_n reduction. ③ When the photosynthetically active radiation (*PAR*) value was 1 200 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, the water use efficiency (*WUE*) of slight water stress was significantly higher than that of full irrigation ($P<0.05$), indicating that moderate water stress could improve the water use efficiency of *M. sativa*. ④ There was no significant difference of hay yield between slight water stress and fully irrigation, indicating that high forage yield and water-saving irrigation could be achieved under slight water stress.

Key words: *Medicago sativa*; drip irrigation; water use efficiency; soil water stress; photosynthesis; biomass; Yongchang; Gansu